

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
29. April 2004 (29.04.2004)

PCT

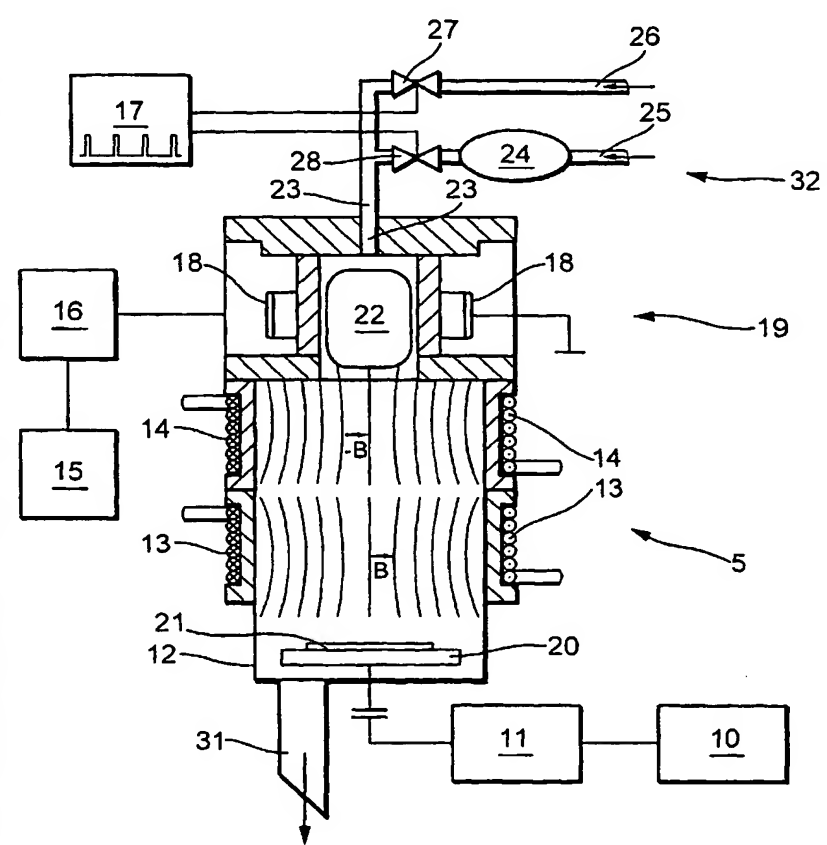
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/036627 A2

- | | |
|--|---|
| <p>(51) Internationale Patentklassifikation⁷:
21/306</p> <p>(21) Internationales Aktenzeichen:
PCT/DE2003/002971</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum:
9. September 2003 (09.09.2003)</p> <p>(25) Einreichungssprache:
Deutsch</p> <p>(26) Veröffentlichungssprache:
Deutsch</p> <p>(30) Angaben zur Priorität:
102 47 913.5 14. Oktober 2002 (14.10.2002) DE</p> | <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): ROBERT BOSCH GMBH [DE/DE]; Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): LAERMER, Franz [DE/DE]; Hermann-Schuetz-Strasse 22, 71263 Weil der Stadt (DE). URBAN, Andrea [DE/DE]; Othellostrasse 15, 70563 Stuttgart (DE).</p> <p>(81) Bestimmungsstaaten (national): JP, US.</p> <p>(84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).</p> |
|--|---|

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: PLASMA SYSTEM AND METHOD FOR ANISTROPICALLY ETCHING STRUCTURES INTO A SUBSTRATE

(54) Bezeichnung: PLASMAANLAGE UND VERFAHREN ZUM ANISOTROPEN EINÄTZEN VON STRUKTUREN IN EIN SUBSTRAT



(57) Abstract: The invention relates to a method and a plasma system (5) for anisotropically etching structures into a substrate (2) arranged in an etching chamber (12), especially a silicon substrate with structures defined by an etching mask, by means of plasma (22). An etching gas and a passivating gas are at least temporarily supplied to the etching chamber (12). The passivating gas is supplied to the etching chamber (12) in a clocked manner, the duration of the clocked intervals of the passivating gas being between 0.05 s and 1 s. The plasma system (5) comprises a plasma source (19) enabling the plasma acting upon the substrate (21) to be produced, means (17, 23, 24, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 30) for at least temporarily supplying the etching gas and the passivating gas to the etching chamber (12) which are embodied in such a way that the passivating gas can be supplied to the etching chamber (12) in a clocked manner, the duration of the clocked intervals of the passivating gas being between 0.05 s and 1 s.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/036627 A2



Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren und eine Plasmaanlage (5) zum anisotropen Einätzen von Strukturen in ein in einer Ätzkammer (12) angeordnetes Substrat (21), insbesondere von mit einer Ätzmaske definierten Strukturen ein Siliziumsubstrat, mittels eines Plasmas (22) vor geschlagen. Dazu wird der Ätzkammer (12) zumindest zeitweilig ein Ätzgas und zumindest zeitweilig ein Passiviergas zugeführt, wobei die Zufuhr des Passiviergases zu der Ätzkammer (12) getaktet mit einer zeitlichen Länge der Passiviergastakte zwischen 0,05 s und 1 s erfolgt. Bei der Plasmaanlage (5) sind dazu neben einer Plasmaquelle (19), mit der das auf das Substrat (21) einwirkende Plasma (22) erzeugbar ist, Mittel (17, 23, 24, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 30) zur zumindest zeitweiligen Zufuhr des Ätzgases und zur zumindest zeitweiligen Zufuhr des Passiviergases zu der Ätzkammer (12) vorgesehen, die derart ausgebildet sind, dass das Passiviergas der Ätzkammer (12) getaktet zuführbar ist, wobei die Passiviergastakte eine zeitlichen Länge zwischen 0,05 s und 1 s aufweisen.

5

Plasmaanlage und Verfahren zum anisotropen Einätzen von Strukturen in ein Substrat

10

Die Erfindung betrifft eine Plasmaanlage und ein Verfahren zum anisotropen Einätzen von Strukturen, insbesondere von mit einer Ätzmaske definierten Strukturen in ein Siliziumsubstrat, mittels eines Plasmas, nach der Gattung der unabhängigen Ansprüche.

15

Stand der Technik

20

Aus DE 42 41 045 C1 ist ein Verfahren zum Hochraten-Plasmaätzen von Silizium bekannt, wobei abwechselnd geätzt und auf den Seitenwänden geätzter Strukturen ein teflonartiges Polymer abgeschieden wird, welches diese bei den darauf folgenden Ätzschritten vor einem Ätzangriff schützt. Als Ätzgase werden im Plasma Fluorradikale liefernde Gase wie SF_6 , NF_3 oder ClF_3 eingesetzt. Als Passiviergase werden im Plasma teflonbildende Monomere liefernde Gase wie C_4F_8 oder C_3F_6 eingesetzt. Dieses Verfahren erlaubt Ätzraten von bis zu $20 \mu\text{m}/\text{min}$ bei exzellenter Strukturgenauigkeit und Selektivität auch gegenüber einfachen Maskenmaterialien wie Photolack oder SiO_2 .

25

Bei dem Verfahren gemäß DE 42 41 045 C1 werden vergleichsweise kurze Depositionsschritte bzw. Passiviergasschritte und länger andauernde Ätzschritte eingesetzt, um eine möglichst hohe Ätzrate zu erzielen. Meist werden in Verbindung mit induktiv gekoppelten Plasmaquellen Rezepte eingesetzt, bei denen Passiviergasschritte von jeweils 3 bis 5 Sekunden und Ätzschritte von jeweils 10 bis 12 Sekunden Dauer einander abwechseln. Bei kürzeren Passiviergasschritten wird es zunehmend schwieriger, diese mit der erforderlichen Genauigkeit über sehr viele Zyklen zu reproduzieren.

30

35

Aufgabe der vorliegenden Erfindung war die Bereitstellung einer Plasmaanlage und eines Verfahrens mit der bzw. dem eine gegenüber dem Stand der Technik höhere Ätzrate bei der anisotropen Ätzung von insbesondere Silizium als Substrat bei gleichzeitig weiterhin

hoher Profilkontrolle und insbesondere auch weiterhin hoher Maskenselektivität erreicht werden kann.

Vorteile der Erfindung

5

Das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Plasmaanlage haben gegenüber dem Stand der Technik den Vorteil einer höheren Ätzrate vor allem bei der anisotropen Ätzung von insbesondere Silizium als Substrat bei gleichzeitig hoher Profilkontrolle und insbesondere auch weiterhin hoher Maskenselektivität.

10

Insbesondere ist vorteilhaft, dass die erreichbare Ätzrate und die Strukturgenauigkeit mit kürzerer Taktzeit der Passiviergastakte immer besser wird, so dass man sich bei den erfindungsgemäß eingesetzten, sehr kurzen Passiviergastakten an einen "optimalen" Prozess annähert, bei dem überhaupt keine Unterbrechungen durch einen Passiviergaseinsatz bzw. überhaupt keine Passivierschritte mehr erforderlich sind, sondern der ununterbrochen ätzt. Andererseits würde ein solcher "optimaler" Prozess zu einer unerwünschten isotropen statt anisotropen Ätzung führen, während der erfindungsgemäße Prozess trotz der kurzen Passiviergastakte weiterhin ein anisotropes Einätzen von Strukturen ermöglicht.

15

20

Die erfindungsgemäße Plasmaanlage und das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt daher eine weitgehende Annäherung an einen "optimalen Prozess" unter Beibehaltung der Anisotropie der Ätzung und einer hohen Profilkontrolle und Maskenselektivität.

25

Bei der erfindungsgemäßen Plasmaanlage ist weiter vorteilhaft, dass sie auf einer üblichen Plasmaanlage, beispielsweise mit einer induktiv gekoppelte Plasmaquelle, aufbauen kann, so dass keine wesentlichen Anlageninvestitionen erforderlich sind bzw. bestehende Plasmaanlagen ohne größeren Aufwand entsprechend nachgerüstet werden können.

30

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den in den Unteransprüchen genannten Maßnahmen.

35

So ist besonders vorteilhaft, dass das erfindungsgemäße Verfahren ohne Weiteres durch Modifikation des Verfahrens zur anisotropen Ätzung von Silizium nach der Art der DE 42 41 045 C1 realisiert oder in dieses integriert werden kann, wobei auch dort ein nahezu

unterbrechungsfreies Plasmaätzen erreichbar ist, das sich durch besonders hohe Ätzraten bei besonders guter Strukturtreue und minimalen Hinterschneidungen oder Wandrauigkeiten auszeichnet.

5 Weiter ist vorteilhaft, wenn bei dem Verfahren auf der Grundlage des Verfahrens gemäß DE 42 41 045 C1 als Passiviergas ein möglichst stark passivierendes, teflonbildende Monomere lieferndes Passiviergas eingesetzt wird. Neben C_4F_8 oder C_3F_6 eignen sich dazu vor allem Fluorkohlenwasserstoffe mit noch niedrigerem Fluor-zu-Kohlenstoff-Verhältnis wie C_4F_6 (Hexafluor-1,3-butadien) oder C_5F_8 (Octafluor-1,3-pentadien) sowie, 10 weniger bevorzugt, auch $C_2H_2F_2$ (Difluoroethylen). Besonders vorteilhaft ist das besonders effizient Polymere bildende C_4F_6 . Diese Gase können bei gegenüber C_4F_8 oder C_3F_6 bevorzugt reduziertem Gasfluss bzw. reduzierter Stoffmenge während der Passivierschritte aus dem Puffertank entnommen werden.

15 Bei den Passiviergasen C_4F_6 und C_5F_8 erfolgt neben den weiterhin einsetzbaren Gasen C_4F_8 oder C_3F_6 insgesamt vorteilhaft eine schnellere Polymerabscheidung aus dem Plasma bei ansonsten vergleichbaren Plasmakennwerten, wobei das deponierte Polymer zudem dichter und dank des niedrigen Fluor-zu-Kohlenstoff-Verhältnisses dieser Gase auch deutlich stärker quervernetzt ist. Zudem ist es durch einen höheren Kohlenstoffgehalt wi- 20 derstandsfähiger gegenüber einem Ätzabtrag.

Da bei der anisotropen Ätzung von Silizium beispielsweise nach der Art der DE 42 41 045 C1 die Effizienz des Aufbaus eines Seitenwandpolymerfilms als Schutzfilm und dessen Beständigkeit im nachfolgenden Ätzschritt neben der im Ätzschritt verfügbaren Fluorradikalkonzentration eine entscheidende Rolle für die Prozessperformance spielt, er- 25 geben sich daraus unmittelbar erhebliche Verbesserungspotenziale.

Insbesondere erlauben die verbesserten Eigenschaften des in den Passivierschritten als Seitenwandfilm deponierten Polymers hinsichtlich Dichtheit, Quervernetzung, eines höheren Kohlenstoffgehaltes und einer erhöhten Widerstandsfähigkeit gegen einen Ätzabtrag bei einem Prozess gemäß DE 42 41 045 C1 erheblich kürzere Passiviergastaktzeiten von deutlich unter 1 s, z.B. von 100 ms bis 500 ms, und weiterhin auch vergleichsweise deutlich verlängerte Ätzgastaktzeiten von ca. 1 s bis hin zu 20 s bis 30 s, d.h. das Ver- 30 hältnis von Ätzzeit zu Passivierzeit verschiebt sich deutlich zugunsten der Ätzzeit auf

Werte von nunmehr 10:1 bis 30 :1 oder sogar mehr. Das höhere zeitliche Gewicht der Ätzschritte an der Gesamtprozesszeit führt unmittelbar zu entsprechend höheren Ätzraten.

Ein weiterer Mechanismus in Richtung höherer Ätzraten resultiert aus dem erläuterten größeren Kohlenstoffgehalt der Seitenwandpolymerfilme, deren stärkerer Quervernetzung und damit deren höherer Beständigkeit gegenüber einem Abtrag.

Da durch die sehr kurzen Passiviergastaktzeiten und die bevorzugt eingesetzten Passiviergase C_4F_6 oder C_3F_8 oder auch $C_2F_2F_2$ zunächst insgesamt weniger Seitenwandpolymermaterial im Vergleich zu den Passiviergasen C_4F_8 oder C_3F_6 während der an sich isotropen Ätzschritte wieder abgetragen, vorwärts getrieben und in tiefer liegenden Regionen der erzeugten Strukturen bzw. der Seitenwände der erzeugten Trenchgräben, welche gerade durch den Ätzschritt eröffnet werden, redeponiert wird, andererseits aber dank der höheren Beständigkeit der erzeugten teflonartigen Seitenwandpolymerfilme immer noch eine ausreichende lokale Passivierwirkung und eine damit verbundene lokale Anisotropie des Ätzschrittes erreicht wird, geht letztlich weniger Fluor durch Wechselwirkung mit während der Ätzschritte ionengetrieben transportierten Polymermaterialien bzw. Passiviergasbestandteile verloren. Die erzielte stärkere C-C-Vernetzung hilft dabei ebenfalls, da Fluorradikale weniger innere C-C-Bindungen als freie äußere C-Bindungen angreifen. Auch dies steigert letztlich die Effizienz des Gesamtätzprozesses.

Die Dynamik des Seitenwandpolymers hat bekanntermaßen einen großen Einfluss auf die netto zur Verfügung stehende Menge an freien Fluorradikalen. Eine höhere, gegenüber Silizium wirksame Fluorradikalkonzentration zusammen mit größeren zulässigen Ätzzyklusdauern bzw. Ätzgastaktzeiten relativ zu den Passivierzyklusdauern bzw. den Passiviergastaktzeiten steigert somit die erzielbaren Ätzraten erheblich.

Die Maskenselektivität wird schließlich vorteilhaft dadurch verbessert, dass die auf der eingesetzten Maske abgeschiedenen Passivierschichten durch die erläuterten Mechanismen nun ebenfalls beständiger sind als nach dem Stand der Technik, und somit während des Ätzprozesses die Substratmaskierung, d.h. bevorzugt die Maskierung eines Siliziumwafers, insbesondere im Falle einer Photolackmaskierung besonders wirksam passiviert wird.

Zeichnungen

Die Erfindung wird anhand der Zeichnungen und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigt Figur 1 eine Prinzipskizze einer Plasmaanlage im Rahmen eines ersten Ausführungsbeispiels, und Figur 2 einen Ausschnitt aus Figur 1 mit einer modifizierten Gaszufuhrsteuerung im Rahmen eines zweiten Ausführungsbeispiels.

Ausführungsbeispiele

Die Figur 1 zeigt eine Plasmaanlage 5 mit einer Ätzkammer 12 und einer Plasmaquelle 19, wie sie aus DE 100 51 831 A1 weitgehend bekannt ist. Insbesondere befindet sich unterhalb der Plasmaquelle 19 ein Ionendiskriminator mit zwei bei Betrieb paarweise gegensinnig von einem Strom durchflossenen Spulen, einer oberen Spule 14 und einer unteren Spule 13, sowie mit einer Driftzone, die beispielsweise durch einen "Spacer" oder einen Distanzring bereitgestellt wird, für eine Ausbreitung eines im Bereich der Plasmaquelle 19 in der Ätzkammer 12 erzeugten Plasmas 22 in Richtung auf ein Substrat 21, beispielsweise einen Siliziumwafer, der sich bevorzugt auf einer Substratelektrode 20 befindet. Die Substratelektrode 20 ist weiter über eine erste Impedanzanpasseinrichtung 11 (erste "Matchbox") mit einem Substratbiasgenerator 10 verbunden. Die Plasmaquelle 19 ist bevorzugt eine induktiv gekoppelte Plasmaquelle mit einer Spule 18, die über eine zweite Impedanzanpasseinrichtung (zweite "Matchbox") mit einem Spulengenerator 15 in Verbindung steht. Schließlich weist die Ätzkammer eine leistungsfähige, in Figur 1 lediglich angedeutete Pumpeinrichtung 31 auf, mit der die Ätzkammer 12 evakuierbar ist. Zu weiteren Einzelheiten zum Aufbau und zum Betrieb der Plasmaanlage 5 sei zunächst auf DE 100 51 831 A1 verwiesen.

Im Unterschied zu der Plasmaanlage gemäß DE 100 51 831 A1 weist die erfindungsgemäße Plasmaanlage 5 eine modifizierte Gasversorgungseinrichtung 32 der Ätzkammer 12 auf. Dazu ist eine möglichst kurze, vorzugsweise nicht mehr als 20 cm lange Zufuhrleitung 23 vorgesehen, die in die Ätzkammer 12 mündet, und die mit einer Ätzgasleitung 26 und einer davon getrennten bzw. unabhängigen Passiviergasleitung 25 verbunden ist. Weiter ist vor der Einmündung der Ätzgasleitung 26 in die Zufuhrleitung 23 ein Ätzgasventil 27 und vor der Einmündung der Passiviergasleitung 25 in die Zufuhrleitung 23 ein Passiviergasventil 28 vorgesehen. Schließlich ist in die Passiviergasleitung 25 vor dem Passiviergasventil 28 ein Puffertank 24 zwischengeschaltet. Im Übrigen kann auch in der Ätzgasleitung 26 vor dem Ätzgasventil 27 ein in Figur 1 nicht dargestellter Puffertank

vorgesehen sein, der den Ätzgaszufluss während der Passiviergastakte, d.h. bei geschlossenem Ätzgasventil 27, puffert.

5 Bevorzugt sind die Ventile 27, 28 möglichst nahe an der Ätzkammer 12 angeordnet, d. h. die den nachfolgenden Ventilen 27, 28 nachfolgenden Gasleitungen sind möglichst kurz. Weiter sollte auch der Puffertank 24 unmittelbar vor dem Passiviergasventil 28 angeordnet sein. Im Übrigen kann auf die Zufuhrleitung 23 auch ganz verzichtet, wenn die Ätzgasleitung 26 und die Passiviergasleitung 25 unmittelbar über zwei zugeordnete Eintrittsöffnungen in die Ätzkammer 12 münden. In diesem Fall befinden sich die Ventile 27, 28
10 bevorzugt jeweils unmittelbar vor diesen Eintrittsöffnungen auf der Ätzkammer 12.

In Figur 1 ist schließlich eine bevorzugt programmierbare Steuereinheit 17 vorgesehen, mit der die Ventile 27, 28 betätigbar sind. Daneben sind zwei in Figur 1 nicht dargestellte Massenflussregler vorgesehen, die vor den Ventilen 27 bzw. 28 angeordnet und der Ätzgasleitung 26 bzw. der Passiviergasleitung 25 zugeordnet bzw. in diese integriert sind.
15 Die Steuereinheit 17 ist bevorzugt auch mit diesen Massenflussreglern verbunden, wie dies in Figur 2 im Rahmen eines zweiten Ausführungsbeispiels erläutert wird. Dort ist der Ätzgasleitung 26 ein erster Massenflussregler 29 und der Passiviergasleitung 27 ein zweiter Massenflussregler 30 zugeordnet, die bevorzugt erneut möglichst nahe an der
20 Ätzkammer 12 angeordnet sind. Alternativ ist es auch möglich, die Massenflussregler 29, 30 entfernt von der Ätzkammer 12 beispielsweise in einer sogenannten "Gasbox" zu platzieren.

Die Steuereinheit 17 ist bevorzugt in die Prozessablaufsteuerung der Plasmaanlage 5 als
25 Hardwarekomponente integriert oder stellt einen Teil der Prozessablaufsteuerung, d.h. insbesondere des Software-Codes, dar.

Der Puffertank 24 weist bevorzugt ein Volumen von 0,1 Liter bis 1 Liter, beispielsweise 0,5 Liter, auf, und ist besonders bevorzugt aus Edelstahl mit elektropolierten Innenwänden ausgeführt. Falls vor dem Ätzgasventil 27 in der Ätzgasleitung 26 ebenfalls ein Puffertank vorgesehen ist, ist dieser bevorzugt analog ausgeführt.
30

Das Ätzgasventil 27 ist bei Betrieb der Plasmaanlage 5 als "normally open"-Ventil ausgelegt, während das Passiviergasventil 28 als "normally closed"-Ventil ausgelegt ist. Die
35 Ventile 27, 28 münden, wie erläutert, möglichst unmittelbar in die Ätzkammer 12, wobei

für die Ausgänge des Ätzgasventils 27 und des Passiviergasventils 28 entweder eigene kurze Gasleitungen mit möglichst hohem Querschnitt und einer Länge von maximal 20 cm vorgesehen sind, oder die gemeinsame kurze Zufuhrleitung 23 mit ebenfalls möglichst hohem Querschnitt. Auch die Verbindung von Puffertank 24 zu dem Passiviergasventil 28 sollte eine Länge von weniger als 20 cm aufweisen und mit möglichst hohem Querschnitt ausgeführt sein. Im Übrigen ist es möglich und meist auch vorteilhaft, das Ätzgasventil 27 und das Passiviergasventil 28 in einem einzigen Umschaltventil zusammenzufassen, das im Ruhezustand die Ätzgasleitung 27 und im aktivierten Zustand die Passiviergasleitung 25 zur Ätzkammer 12 durchschaltet. Dies führt in einfacher Weise zu einer perfekten Synchronisation der Öffnungs- und Schließoperationen für die Leitungen 25, 27.

Mit der Plasmaanlage 5 wird ein anisotropes Einätzen von mit Hilfe einer Ätzmaske lateral exakt definierten Strukturen in Silizium, d.h. das Substrat 21, gemäß DE 41 42 045 C1 vorgenommen, wobei als Passiviergas bevorzugt C_4F_6 eingesetzt wird. Dazu werden die Ventile 27, 28 abwechselnd geöffnet und geschlossen. Bevorzugt ist das Passiviergasventil 28 und besonders bevorzugt auch das Ätzgasventil 29 ein schnell schaltendes, beispielsweise elektromagnetisches Ventil, das beispielsweise direkt mit einem 24 V-Signal angesteuert werden kann, und das Schaltzeiten im Bereich von einigen 10 Millisekunden aufweist. Liegen dabei 24 V an, schließt das Ätzgasventil 28 und sperrt das in der Ätzgasleitung 26 geführte Ätzgas von der Ätzkammer 12 ab, während das Passiviergasventil 28 öffnet und das in der Passiviergasleitung 25 geführte Passiviergas zur Ätzkammer 12 frei gibt. Entsprechend schaltet ein Umschaltventil bei angelegter 24 V-Spannung die Ätzkammer um von Ätzgas auf Passiviergas, d.h. auf den Puffertank 24. Alternativ sind für die Ventile 27, 28 auch pneumatische Ventile mit elektrischen Vorsteuerventilen denkbar, wobei jedoch ein langsames Ansprechen in Kauf genommen werden muss.

Bei Betrieb der Plasmaanlage 5 im Rahmen eines Ätzverfahrens gemäß DE 42 41 045 C1 wird beispielsweise ein Ätzgasfluss von 300 bis 1000 sccm SF_6 , vorzugsweise 500 sccm SF_6 , und ein Passiviergasfluss von 10 bis 500 sccm C_4F_6 , vorzugsweise 50 sccm bis 200 sccm C_4F_6 (sccm = cm^3/min bei Normaldruck) eingesetzt. Die an der induktiven Plasmaquelle 19 eingesetzten Leistungen liegen bei 2000 W bis 5500 Watt.

Die der Ätzgasleitung 26 bzw. der Passiviergasleitung zugeordneten Massenflussregler 29, 30 werden in einer ersten Verfahrensvariante jeweils auf einen festen Gasfluss einge-

stellt, beispielsweise 500 sccm SF_6 und 100 sccm C_4F_6 . Das Ätzgas SF_6 fließt zunächst über das geöffnete Ventil 27 in die Ätzkammer 12, während das Passiviergas C_4F_6 zunächst den Puffertank 24 füllt und durch das geschlossene Ventil 28 am Einströmen in die Ätzkammer 12 gehindert wird. Nach beispielsweise 5 Sekunden wird dann durch die

5 Steuereinheit 17 ein kurzer Impuls auf die beiden Ventile 27, 28 gegeben, so dass sich das Ventil 27 schließt und für einen kurzen Zeitraum von 0,05 s bis 1 s, vorzugsweise von 0,1 s bis 0,5 s, den weiteren Zufluss des Ätzgases in die Ätzkammer 12 sperrt, während sich das Passiviergasventil 28 für diesen Zeitraum öffnet und den Weg des Passiviergases in die Ätzkammer 12 frei gibt, so dass sich der Puffertank 24 nahezu instantan

10 in die Ätzkammer 12 hin entleert. Nach Ablauf der vorgewählten Taktzeit von 0,05 Sekunden bis 1 Sekunde, beispielsweise 0,3 Sekunden, wird dann durch entsprechende elektrische Signale aus der Steuereinheit 17 das Ventil 27 wieder geöffnet und entsprechend Ventil 28 wieder geschlossen, d.h. das Ätzgas strömt wieder in die Ätzkammer 12 und das Passiviergas füllt wieder den Puffertank 24, bis sich nach weiteren 5

15 Sekunden das erläuterte Schaltspiel wiederholt. Als zeitlicher Abstand zwischen den Passiviergastakten, d.h. als zeitliche Dauer der Ätzgastakte, werden 1 s bis 15 s, vorzugsweise 2 s bis 7 s, eingestellt.

Insgesamt wird auf diese Weise die weitaus überwiegende Zeit geätzt und der Ätzvorgang nur während der sehr kurzen Passiviergastakte unterbrochen und ein Schwall von Passiviergas der Plasmaquelle 19 zugeführt, so dass sich ein "Hauch" von Teflonpassivierung über alle geätzten Strukturen legt und die erforderliche Seitenwandpassivierung auch für den nachfolgenden Ätzschritt bereitstellt.

25 In der vorstehend erläuterten Verfahrensführung arbeiten die Massenflussregler 29, 30 kontinuierlich. Für den Ätzgasfluss ist die kurzzeitige Unterbrechung des Zugangs zur Ätzkammer 12 dabei ohne Bedeutung bzw. kann bei Bedarf durch den erläuterten zusätzlichen Puffertank für das Ätzgas abgefangen werden. Das Passiviergas fließt von dem zweiten Massenflussregler 30 durchgängig in den Puffertank 24, der sich periodisch während der sehr kurzen Passiviergastakte in die Ätzkammer 12 entleert. Insofern entscheidet,

30 nun die Menge des im Puffertank 24 vor dem Öffnen des Passiviergasventils 28 akkumulierten Passiviergases über die Menge an Seitenwandpassivierung, die in den Ätzprozess eingetragen wird. Bei einem zeitlichen Abstand t_1 zwischen den einzelnen Passiviergastakten, der in der erläuterten Verfahrensführung gleichbedeutend mit der zeitlichen

Länge der Ätzyklen oder der Ätzgastakte ist, ist die in dem Puffertank 24 akkumulierte Stoffmenge des Passiviergases gleich dem Produkt aus Gasfluss und dieser Zeit t_1 .

In einer alternativen zweiten Verfahrensführung wird der zweite Massenflussregler 30 über die Steuereinheit 17 gemäß Figur 2 zusätzlich mit der Steuerung der Ventile 27, 28 synchronisiert getaktet. Dadurch wird die Schwierigkeit bzw. der Nachteil umgangen, dass die Stoffmenge des Passiviergases, die während der Passiviergastakte in die Ätzkammer 12 gelangt, direkt mit dem zeitlichen Abstand der Passiviergastakte, der der Ätzschriddauer entspricht, skaliert, so dass jede Änderung der Ätzschriddauer bzw. der Ätzgastaktzeit auch zu einer Änderung der akkumulierten Passiviergasmenge in dem Puffertank 24 führt.

Wird beispielsweise der zeitliche Abstand zwischen den Passiviergastakten, also die Ätzschriddauer halbiert, so wird dementsprechend auch die Zeitdauer, während der der Puffertank 24 mit Passiviergas gefüllt wird, halbiert. Um diese halbe Aufladezeit zu korrigieren, muss dann im Prozessprogramm über die Steuereinheit 17 der von dem zweiten Massenflussregler 30 zu liefernde Passiviergasfluss verdoppelt werden.

Diese zu einer vergleichsweise aufwändigen Prozessanpassung auf den Einzelfall führende Kopplung der Ätzschriddauer oder Ätzgastaktzeit t_2 und des zeitlichen Abstandes t_1 der einzelnen Passiviergastakte wird nun bevorzugt dadurch vermieden, dass der zweite Massenflussregler 30 über die Steuereinheit 17 lediglich über eine Tankladezeit t_L aktiv geschaltet wird, die kürzer ist als die Ätzschriddauer t_2 . Dazu wird nach einem Wiedereinsetzen des Ätzigasflusses in die Ätzkammer 12 der zweite Massenflussregler 30 für eine Zeitspanne $t_2 - t_L$ ausgeschaltet, d. h. der angeforderte Passiviergasfluss während dieser Zeit auf 0 gesetzt. Erst nach Ablauf der Wartezeit $t_2 - t_L$ nach dem Beginn des Ätzschriffs wird dann der zweite Massenflussregler 30 wieder bis zum Ende des darauf folgenden Passiviergastaktes bzw. zum Beginn des darauf folgenden Ätzgastaktes auf seinen Sollgasfluss gesetzt. Dabei wird beispielsweise wird $t_2 = 5$ Sekunden, $t_L = 2$ Sekunden und der zu Passiviergasfluss zu 200 sccm gewählt.

Auch diese Verfahrensführung weist jedoch noch den Nachteil auf, dass während der Passiviergastakte nicht nur der Inhalt des Puffertanks 24 in die Ätzkammer 12 strömt, sondern auch noch eine geringe Passiviergasmenge während des Passiviergastaktes von dem zweiten Massenflussregler 30 nachgeliefert wird. Zwar ist der Passiviergastakt kurz

und diese Menge entsprechend klein, es wird damit aber das Ansprechverhalten des Passiviergasventils 28 in den Prozess übertragen.

In dritten Verfahrensvariante wird daher der zweite Massenflussregler 30 von der Steuereinheit 17 so gesteuert, dass der Passiviergasfluss erst nach dem Schließen des Passiviergasventils 28 auf seinen Sollwert hochgeregt wird und dort über die Tankladezeit t_L , die kleiner als die Ätzschriddauer t_2 oder die Zeit zwischen den Passiviergastakten t_1 ist, dort verbleibt, nach Ablauf von t_L aber für die restliche Zeit t_2 oder t_1 auf 0 zurückgeregt wird. Dabei ist t_L stets kleiner t_1 oder t_2 . In dem Puffertank 24 verbleibt also die während der Zeitspanne t_L eingeströmte Passiviergasmenge so lange eingeschlossen, bis das Passiviergasventil 28 kurz geöffnet wird und die gespeicherte Passiviergasmenge in die Ätzkammer 12 überströmen kann. Während dieser Zeit ist weiter der zweite Massenflussregler 30 noch auf 0 geregelt und kann somit kein Passiviergas nachliefern. Die zugeführte Stoffmenge an Passiviergas ist bei dieser Verfahrensführung besonders präzise einstellbar und unabhängig vom Schaltverhalten des Passiviergasventils 28 bestimmt, was die Prozesseinstellung erleichtert.

In einer vierten Verfahrensvariante werden ausgehend von einer der erläuterten Verfahrensvarianten mindestens einer der Parameter Ätzschriddauer t_2 , Tankladezeit t_L , Ätzgasfluss, Passiviergasfluss oder eine über die Substratelektrode 20 in das Substrat 20 eingekoppelte Substratbiasleistung als Funktion der Zeit so variiert, dass der Prozess zunächst mit einem hohen Anteil an Passivierung startet und während des Prozesses die Menge an deponiertem Polymer kontinuierlich oder in diskreten Schritten abnimmt.

Obwohl die erläuterten Verfahren an sich unabhängig von den Details einer bestimmten Plasmaquelle 19 sind, so sind doch bestimmte Randbedingungen zu berücksichtigen. So hat ein Gaspulsbetrieb, bei dem schlagartig eine erhebliche Stoffmenge eines Gases im Austausch mit einem anderen Gas in die Plasmaquelle 19 strömt, darin einen sprunghaften Druckanstieg und veränderte Plasmabedingungen, auch hinsichtlich der Gassorte und deren Elektronegativität, zur Folge.

Für ein Verfahren gemäß DE 42 41 045 C1 ist es andererseits wichtig, dass das Plasma 22 stets stabil bleibt und über die zweite Impedanzanpasseinrichtung 16 stets gut "gematcht" ist, d.h. möglichst nicht ausgeht oder blinkt. Dies erfordert eine Plasmaquelle 19, die tolerant ist gegenüber Prozessschwankungen. Insofern wird bevorzugt eine insbeson-

dere induktiv gekoppelte Plasmaquelle 19 mit hoher eingekoppelter Hochfrequenzleistung von 3000 Watt bis 5500 Watt und eine Ätzkammer mit einem möglichst kleinen Innendurchmesser von lediglich 5 cm bis 20 cm, insbesondere 9 cm bis 15 cm, eingesetzt. Die Leistung pro Fläche im Bereich der Plasmaquelle 19 oder am Ort des Substrates 21 wird auf diese Weise um mehr als eine Größenordnung auf Werte von mehr als 5 Watt/cm², insbesondere 20 Watt/cm² bis 30 Watt/cm², gesteigert. Ein derartiges Plasma 22 ist besonders tolerant gegenüber Prozessparameterschwankungen.

Um die Uniformität der Ätzergebnisse über Oberfläche des Substrates 21 dabei trotz der verkleinerten Ätzkammer 12 nicht zu beeinträchtigen, ist es sehr vorteilhaft, den in DE 100 51 831 A1 beschriebenen magnetischen Ionendiskriminator in Kombination mit einer Driftzone bei der Plasmaanlage 5 einzusetzen. Dadurch kommt es einerseits zu einer Homogenisierung der Verteilung der neutralen Radikale aus dem Plasma 22 auf ihrem Weg von der Plasmaquelle 19 hin zum Substrat 21, während der magnetische Ionendiskriminator für eine Homogenisierung bzw. Fokussierung des Ionenstromes zu dem Substrat 21 und eine Reflexion von Elektronen sorgt. Überdies treten die über die untere Spule 13 und die obere Spule 14 erzeugten Magnetfelder auch in die Plasmaquelle 19 selbst über und bewirken dort eine gesteigerte Elektronendichte in dem Plasma 22, das entsprechend robuster und toleranter gegenüber sprunghaften Änderungen wesentlicher Gasparameter wie Druck, Gasfluss, Gassorte und Elektronegativität wird.

Alternativ zu den vorstehend erläuterten Verfahrensvarianten wurde schließlich auch der Einsatz von Ventilen erprobt, die die Zufuhr von Ätzgas und Passiviergas alternierend zwischen der Ätzkammer 12 und einer in Figur 1 nicht dargestellten Bypassleitung zu einer Vorvakuumpumpe umschalten. Dies ermöglicht zwar ebenfalls die gewünschten kürzeren Taktzeiten, da dann nicht mehr die Regelgeschwindigkeit der Massenflussregler 29, 30 sondern die Schließzeiten der Ventile für die Taktzeiten entscheidend sind. Dieses Vorgehen hat aber den Nachteil, dass ein erheblicher Anteil der teuren Prozessgase ungenutzt verloren geht und als Abgas abgeführt werden muss. Dies gilt insbesondere für das Passiviergas, das ja nur für möglichst kurze Zeit, dafür aber vorteilhaft mit entsprechend großem Gasfluss der Ätzkammer 12 zugeführt werden soll, und das während der übrigen Zeit, d.h. der Ätzschritt-dauer bzw. während des nachfolgenden Ätzgastaktes ungenutzt über die Bypassleitung abströmt. Dieses Vorgehen ist somit zwar möglich, jedoch vergleichsweise unwirtschaftlich.

5

Patentansprüche

- 10 1. Verfahren zum anisotropen Einätzen von Strukturen in ein in einer Ätzkammer (12) angeordnetes Substrat (21), insbesondere von mit einer Ätzmaske definierten Strukturen in ein Siliziumsubstrat, mittels eines Plasmas (22), wobei zumindest zeitweilig ein Ätzgas und zumindest zeitweilig ein Passiviergas eingesetzt wird, dadurch gekennzeichnet, dass das Passiviergas der Ätzkammer (12) getaktet zugeführt wird, wobei die Passiviergastakte eine zeitliche Länge zwischen 0,05 s und 1 s aufweisen.
- 15 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass jeder der Passiviergastakte eine insbesondere gleiche zeitliche Länge zwischen 0,1 s bis 0,5 s aufweist.
- 20 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass auch das Ätzgas der Ätzkammer (12) getaktet zugeführt wird, wobei jeder Ätzgastakt eine zeitliche Länge zwischen 1 s und 15 s, insbesondere 2 s bis 7 s, aufweist.
- 25 4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Ätzgas und das Passiviergas alternierend während separater, unabhängig voneinander gesteuerter Ätzschritte und Passivierschritte eingesetzt werden, wobei das Passiviergas der Ätzkammer (12) zumindest weitgehend lediglich während der Passivierschritte und das Ätzgas, insbesondere SF_6 , der Ätzkammer (12) zumindest weitgehend lediglich während der Ätzschritte zugeführt wird.
- 30 5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als Passiviergas ein Gas ausgewählt aus der Gruppe C_4F_8 , C_3F_6 , C_4F_6 , C_5F_8 oder $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$ oder eine Gasmischung mit mindestens einem dieser Gase eingesetzt wird.
- 35 6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das anisotrope Einätzen in separaten, alternierend aufeinander folgenden Ätzschrit-

ten und Passivierschritten erfolgt, wobei mit Hilfe des Passiviergases während der Passivierschritte auf die durch die Ätzmaske definierte laterale Begrenzung der Strukturen ein insbesondere teflonartiges Polymer aufgebracht wird, das während des nachfolgenden Ätzschrittes zumindest teilweise wieder abgetragen und in tieferen Regionen der erzeugten Struktur redeponiert wird.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Dauer der Passivierschritte um einen Faktor 10 bis 30 kürzer als die Dauer der Ätzschritte eingestellt wird.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein hochdichtes Plasma (22) mit mindestens 10^{12} reaktiven Spezies/cm³ erzeugt wird, und dass zumindest zeitweilig während der Ätzschritte ein insbesondere gepulster Ionenbeschuss des Substrates (21), insbesondere mit einer Ionenenergie von 1 eV bis 100 eV im Dauerstrichbetrieb oder im zeitlichen Mittel, erfolgt.

9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die während der einzelnen Passivierschritte jeweils eingesetzte Menge an Passiviergas mit einem Fortschreiten des Einätzens kontinuierlich oder schrittweise reduziert wird.

10. Plasmaanlage zum anisotropen Einätzen von Strukturen in ein Substrat (21), insbesondere von mit einer Ätzmaske definierten Strukturen ein Siliziumsubstrat, mit einer Ätzkammer (12), in der bei Betrieb der Plasmaanlage (5) das Substrat (21) insbesondere auf einer Substratelektrode (20) angeordnet ist, einer Plasmaquelle (19), mit der ein auf das Substrat (21) einwirkendes Plasma (22) erzeugbar ist, und Mitteln (17, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30) zur zumindest zeitweiligen Zufuhr eines Ätzgases und zur zumindest zeitweiligen Zufuhr eines Passiviergases zu der Ätzkammer (12), dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel (17, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30) derart ausgebildet sind, dass das Passiviergas der Ätzkammer (12) getaktet zuführbar ist, wobei die Passiviergastakte eine zeitliche Länge zwischen 0,05 s und 1 s aufweisen.

11. Plasmaanlage nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel (17, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30) derart ausgebildet und eine Pumpeinrichtung (31) zum Evakuieren der Ätzkammer (12) derart vorgesehen ist, dass das Ätzgas und das Passiviergas alternierend während separater, unabhängig voneinander gesteuerter Ätzschritte und

Passivierschritte der Ätzkammer (12) zugeführt werden, und dass die Ätzkammer (12) während der Ätzschritte zumindest in dem Bereich, in dem die Plasmaquelle (19) auf das Ätzgas einwirkt, zumindest näherungsweise frei von dem Passiviergas und die Ätzkammer (12) während der Passivierschritte zumindest in dem Bereich, in dem die Plasmaquelle (19) auf das Passiviergas einwirkt, zumindest näherungsweise frei von dem Ätzgas ist.

12. Plasmaanlage nach einem der Ansprüche 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass eine Passiviergasleitung (25) und eine davon verschiedene Ätzgasleitung (26) vorgesehen sind, die jeweils direkt in die Ätzkammer (12) münden, oder dass eine Passiviergasleitung (25) und eine davon verschiedene Ätzgasleitung (26) vorgesehen sind, die unmittelbar, insbesondere in einem Abstand von weniger als 20 cm, vor der Ätzkammer (12) in eine Zufuhrleitung (23) münden, die zu der Ätzkammer (12) führt.

13. Plasmaanlage nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Passiviergasleitung (25) vor der Ätzkammer (12) oder vor dem Münden der Passiviergasleitung (25) in die Zufuhrleitung (23) mit einem zwischengeschalteten Puffertank (24) und einem diesem nachgeordneten schnell schaltenden Passiviergasventil (28) versehen ist.

14. Plasmaanlage nach einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Ätzgasleitung (26) mit einem Ätzgasventil (27) versehen ist, mit dem der Zufuhr von Ätzgas zu der Ätzkammer (12) insbesondere unmittelbar vor einer Zufuhr von Passiviergas zu der Ätzkammer (12) unterbrechbar ist.

15. Plasmaanlage nach einem der Ansprüche 10 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Ätzgasventil (27) und/oder das Passiviergasventil (28) unmittelbar, insbesondere in einem Abstand von weniger als 20 cm, vor der Mündung der Ätzgasleitung (26) und/oder der Passiviergasleitung (25) in die Ätzkammer (12) oder die Zufuhrleitung (23) angeordnet ist.

16. Plasmaanlage nach einem der Ansprüche 10 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass das Ätzgasventil (27) und das Passiviergasventil (28) in einem Umschaltventil zusammengefasst sind, über das wahlweise die Ätzgasleitung (26) oder die Passiviergasleitung (25) gasdurchgängig mit der Ätzkammer (12) verbindbar ist.

17. Plasmaanlage nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Puffertank ein Volumen von 0,1 Liter bis 1 Liter aufweist.

5 18. Plasmaanlage nach einem der Ansprüche 10 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass das eine insbesondere induktiv gekoppelte Plasmaquelle (19) vorgesehen ist und die Ätzkammer (12) zumindest in dem Bereich der Plasmaquelle (19) einen Innendurchmesser von 5 cm bis 20 cm aufweist, so dass bei Betrieb der Plasmaanlage (5) und Speisung der Plasmaquelle (19) über einen Hochspannungsgenerator (15) im Inneren der Ätzkammer (12) in dem Bereich der Plasmaquelle (19) oder am Ort des Substrates (21) eine Leistung pro Fläche von mehr als 5 Watt/cm², insbesondere mehr als 15 Watt/cm², erreichbar ist.

15 19. Plasmaanlage nach einem der Ansprüche 10 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der Plasmaquelle (19) und dem Substrat (21) mindestens eine die Ätzkammer (12) umgebende Spule (13, 14), insbesondere mindestens zwei, die Ätzkammer (12) äußerlich umgebende, bei Betrieb paarweise gegensinnig von einem Strom durchflossene, untereinander angeordnete Spulen (13, 14), vorgesehen sind.

20 20. Plasmaanlage nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass damit ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9 durchführbar ist.

